

УДК 621.317.727.1

ОЦЕНКА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ИНДУКТИВНОМ ДЕЛИТЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ С СИММЕТРИРУЮЩЕЙ ОБМОТКОЙ

В.Л. Ким

Томский политехнический университет

E-mail: kimval11@rambler.ru

Предложено обобщенное описание передаточной функции декадного индуктивного делителя напряжения с симметрирующей обмоткой. Сформулированы условия минимизации динамической погрешности и перенапряжений. Приведены результаты экспериментальных исследований делителя.

Ключевые слова:

Индуктивный делитель напряжения, передаточная функция, переходная характеристика, перенапряжение.

Key words:

Inductive voltage divider, transfer function, step response, glitch.

При системном использовании индуктивных делителей напряжения (ИДН) в составе, например, калибраторов напряжения с ручным или программным управлением [1] наряду с амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками нормируют и другую полную характеристику – переходную. По последней определяются перенапряжения и время реакции [2].

Статья посвящена исследованию перенапряжений в декадном ИДН с симметрирующей обмоткой (ИДНСО) [1, 3], имеющему не только теоретическое, но важное практическое значение для правильного применения делителя.

Анализ переходных процессов наиболее распространенных декадных делителей в значительной степени затруднен высоким порядком (более двадцати пяти) их математических моделей [4].

Среди аналитических методов расчета переходных процессов отметим метод, предложенный в работе [5] и базирующийся на распределенной модели декадного ИДН. Однако из-за упрощений и пренебрежений высокочастотными составляющими колебательных процессов полученные переходные функции не позволяют определить перенапряжения в области малых времен.

Приемлемые для практического применения способы расчета переходных процессов приведены в [6], где импульсный трансформатор представлен в виде линейной цепи с сосредоточенными параметрами. Данный подход применим с учетом особенностей и для ИДН, верхняя граница рабочего диапазона частот которых достигает нескольких сотен кГц. К таким делителям относится ИДНСО, один из вариантов которого приведен на рис. 1.

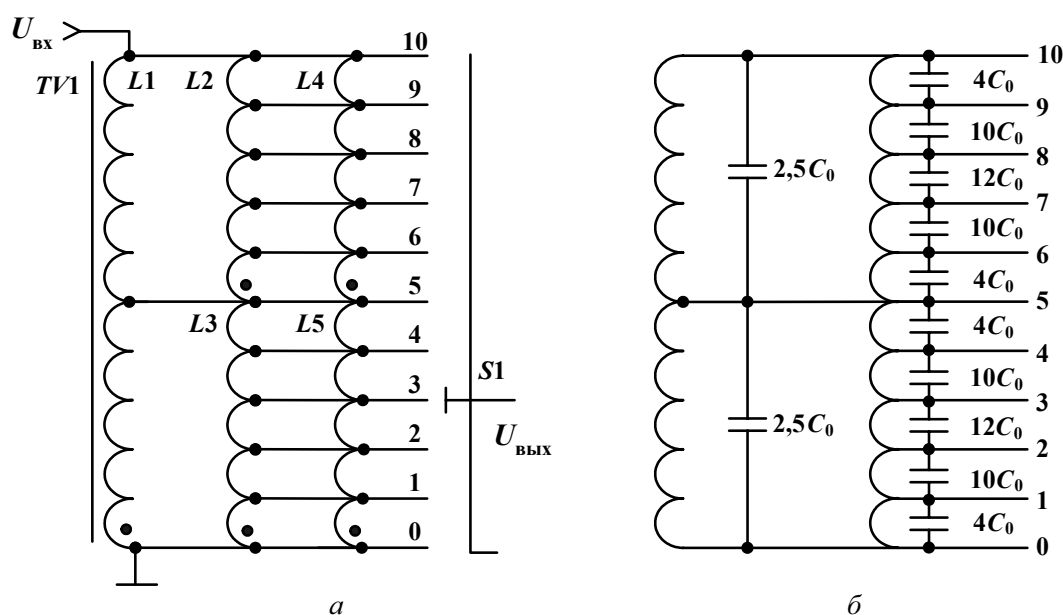


Рис. 1. ИДНСО: а) принципиальная схема; б) эквивалентные емкости секций

На тороидальном ферромагнитном сердечнике размещаются пять делительных обмоток $L1-L5$ (рис. 1, а), в совокупности образующих декаду $TV1$. Симметрирующая обмотка $L1$, представляющая собой двоичный делитель, выполняется двухпроводным жгутом. Пятисекционные обмотки $L2$ и $L4$ изготавливаются из первого десятипроводного жгута, а обмотки $L3$ и $L5$ — из второго десятипроводного жгута. Обмотки $L2-L5$ образуют делительную обмотку с отводами 0–10. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ снимается с этих отводов посредством многопозиционного переключателя $S1$.

При известных значениях шунтирующих эквивалентных емкостей двух- и пятисекционных обмоток [1] получим распределение емкостей, рис. 1, б.

Специфика ИДНСО, как и других автотрансформаторных ИДН, выполненных намоткой многопроводными жгутами на ферромагнитном сердечнике, заключается в тесной (сильной) индуктивной связи между секциями обмотки. При этом обеспечивается высокая идентичность таких параметров секций как активные сопротивления проводов, индуктивности рассеяния и ЭДС. Однако неодинаковость эквивалентных емкостей, шунтирующих секции, приводит к появлению частотных погрешностей напряжений на выходных отводах декадного ИДН. Логично предположить, что и параметры переходных процессов на выходах делителя также будут отличаться [1].

В дальнейшем рассмотрим так называемые быстрые переходные процессы [7]. Обусловлено это тем, что в ИДН только в области малых времен проявляются явления перенапряжений, оказывающие негативное влияние на работу нагрузки. Особенно актуальны эти вопросы при проверке и калибровке современных многозарядных аналого-цифровых преобразователей, для которых недопустимо превышение диапазона измерений более, чем в 1,5 раза.

Упрощенный анализ переходных процессов ИДН проведем по его абстрактной модели (рис. 2).

При высокой точности двоичного делителя [8] и пренебрежении активными сопротивлениями проводов секций делительная обмотка представляет собой десять последовательно соединенных параллельных контуров без потерь. Индуктивностями последних являются индуктивности рассеяния секций L_s , емкостями — эквивалентные емкости секций. Заметим, что шунтирующие емкости отличаются значимо: от $4C_0$ до $12C_0$, где C_0 — средняя межпроводная емкость жгута. Без потери общности рассуждений и исключения громоздких преобразований ограничимся при расчете коэффициентов передач на выходных отводах в операторном виде степенями полиномов не более четырех

$$K_n(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{a_{0n}}{b_{0n}} \cdot \frac{1 + a_{1n}p^2 + a_{2n}p^4}{1 + b_{1n}p^2 + b_{2n}p^4},$$

где $U_{\text{вх}}(p)$, $U_{\text{вых}}(p)$ — входное и выходное напряжения; $a_{0n}/b_{0n} = 0,1n = K_{nn}$ — номинальный коэффициент передачи; $n=1,9$ — номер отвода.

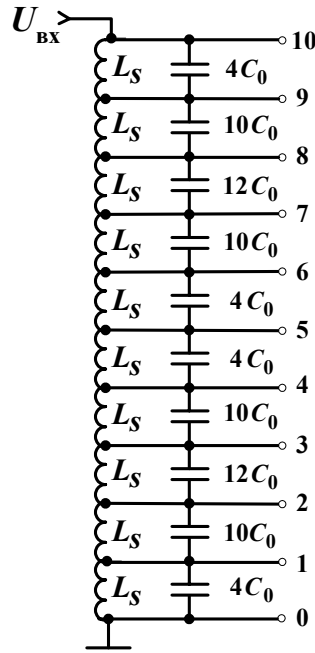


Рис. 2. Эквивалентная схема ИДНСО

Заметим, что для декадного ИДН $b_{0n}=10$. Значения a_{0n} , a_{1n} , a_{2n} , b_{1n} , b_{2n} , выраженные через константу $\Lambda = L_s C_0$, приведены в табл. 1.

Запишем приведенный коэффициент передачи в виде

$$K_{nnp}(p) = \frac{K_n(p)}{K_{nn}} = \frac{1 + a_{1n}p^2 + a_{2n}p^4}{1 + b_{1n}p^2 + b_{2n}p^4}. \quad (1)$$

Для ИДНСО, как и любых других ИДН [1], $a_{1n} \ll 1$, $a_{2n} \ll 1$, $b_{1n} \ll 1$, $b_{2n} \ll 1$. Тогда выражение (1) можно записать в виде

$$K_{nnp}(p) = 1 + (a_{1n} - b_{1n})p^2 + (a_{2n} - b_{2n})p^4 = 1 + \delta_n(p); \quad (2)$$

$$\delta_n(p) = (a_{1n} - b_{1n})p^2 + (a_{2n} - b_{2n})p^4. \quad (3)$$

Заметим, что (3) представляет собой относительную погрешность коэффициента передачи в операторном виде.

Приведенная динамическая погрешность равна

$$\Delta_{nnp}(p) = \frac{[K_n(p) - K_{nn}]U_{\text{вх}}(p)}{K_{nn}} = \delta_n(p)U_{\text{вх}}(p). \quad (4)$$

Из анализа формул (3) и (4) с учетом принятой линейной модели ИДНСО можно сформулировать условия повышения его точности: частотная, динамическая погрешности и показатели качества переходных процессов будут минимальными, если минимальны разности коэффициентов при одинаковых степенях полиномов числителя и знаменателя приведенного коэффициента передачи делителя.

Действительно в случае $a_{1n}=b_{1n}$ и $a_{2n}=b_{2n}$ из выражений (3) и (4) следует $\delta_n(p)=0$, $\Delta_{nnp}(p)=0$, а из (2) и (1) видно, что $K_n(p)=K_{nn}$. Последнее равенство соответствует частотонезависимому делителю с идеальной переходной характеристикой.

Таблица 1. Коэффициенты полиномов передаточной функции ИДНСО

Коэффициент передаточной, $K_{\text{пр}}$	Коэффициенты полиномов				
	a_{0n}	a_{1n}	a_{2n}	a_{3n}	a_{4n}
0,1	1	40Λ	0	36Λ	128Λ ²
0,2	2	47Λ	280Λ ²	46Λ	448Λ ²
0,3	3	57,3Λ	693Λ ²	58Λ	832Λ ²
0,4	4	67Λ	1080Λ ²	68Λ	1152Λ ²
0,5	5	72Λ	1280Λ ²	72Λ	1280Λ ²
0,6	6	76,7Λ	1467Λ ²	76Λ	1408Λ ²
0,7	7	86,3Λ	1851Λ ²	86Λ	1728Λ ²
0,8	8	97,7Λ	2310Λ ²	98Λ	2112Λ ²
0,9	9	107,6Λ	2702Λ ²	108Λ	2432Λ ²

Как видно из табл. 1 условия минимизации нарушаются для первого отвода (т. е. $K_{\text{пр}}=0,1$), где $a_{2n}=a_{4n}=0$. Так как коэффициент b_{21} при наивысшей степени полинома остается некомпенсированным, то следует ожидать ухудшения качества переходных процессов в области малых времен. Покажем это далее.

По формуле (2) с учетом коэффициентов табл. 1 после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} K_{1\text{пр}}(p) &= 1 + 4\Lambda p^2 - 128\Lambda^2 p^4, \\ K_{2\text{пр}}(p) &= 1 + \Lambda p^2 - 168\Lambda^2 p^4, \\ K_{3\text{пр}}(p) &= 1 - 0,7\Lambda p^2 - 139\Lambda^2 p^4, \\ K_{4\text{пр}}(p) &= 1 - \Lambda p^2 - 72\Lambda^2 p^4, \\ K_{5\text{пр}}(p) &= 1, \\ K_{6\text{пр}}(p) &= 1 + 0,7\Lambda p^2 + 59\Lambda^2 p^4, \\ K_{7\text{пр}}(p) &= 1 + 0,3\Lambda p^2 + 123\Lambda^2 p^4, \\ K_{8\text{пр}}(p) &= 1 - 0,3\Lambda p^2 + 198\Lambda^2 p^4, \\ K_{9\text{пр}}(p) &= 1 - 0,4\Lambda p^2 + 270\Lambda^2 p^4. \end{aligned}$$

Отсюда с учетом (4), (2) и единичной ступенчатой функции в операторном виде $U_{\text{вх}}(p)=1/p$ находим приведенные динамические погрешности

$$\begin{aligned} \Delta_{1\text{пр}}(p) &= 4\Lambda p - 128\Lambda^2 p^3, \\ \Delta_{2\text{пр}}(p) &= \Lambda p - 168\Lambda^2 p^3, \\ \Delta_{3\text{пр}}(p) &= -0,7\Lambda p - 139\Lambda^2 p^3, \\ \Delta_{4\text{пр}}(p) &= -\Lambda p - 72\Lambda^2 p^3, \\ \Delta_{5\text{пр}}(p) &= 0, \\ \Delta_{6\text{пр}}(p) &= 0,7\Lambda p + 59\Lambda^2 p^3, \\ \Delta_{7\text{пр}}(p) &= 0,3\Lambda p + 123\Lambda^2 p^3, \\ \Delta_{8\text{пр}}(p) &= -0,3\Lambda p + 198\Lambda^2 p^3, \\ \Delta_{9\text{пр}}(p) &= -0,4\Lambda p + 270\Lambda^2 p^3. \end{aligned} \quad (5)$$

В реальных ИДНСО константа $\Lambda \approx 10^{-15} \dots 10^{-17} \text{ с}^2$ [1], поэтому максимальная приведенная динамическая погрешность наблюдается на первом отводе, т. е. $\Delta_{\text{пр max}} = \Delta_{1\text{пр}}(p)$. Следовательно, и параметры переходного процесса, в том числе и перенапряже-

ние, для нижнего отвода делительной обмотки будут наихудшими.

Более точную проверку этой гипотезы можно было бы осуществить по переходной характеристике, построенной по адекватной сравнительно полной математической модели (передаточной функции) ИДН. Получение последней с порядком полиномов более четырех даже машинными методами представляет собой сложную задачу [4]. В таком случае предпочтительным способом исследования переходных характеристик следует считать проведение натурных испытаний по прямому методу с помощью ступенчатого испытательного сигнала [2, 9]. По полученным результатам и оценивается частная динамическая характеристика — перенапряжение. Этот параметр используется не только при решении задач контроля, сравнения и выбора ИДН [9], но и обеспечения безопасной работы нагрузок.

Для экспериментальных исследований был изготовлен опытный образец декадного ИДНСО. В качестве сердечника использовался тороид с прямоугольным сечением из аморфного железа ГМ32ДС (максимальная относительная магнитная проницаемость $\mu_{\text{max}}=300000$, индукция насыщения $B_s=0,4 \text{ Тл}$ на частоте 20 Гц) размерами 70×40×40 мм. Жгуты симметрирующей и делительной обмоток выполнены проводами марки ПЭВ-2 диаметра 0,25 мм, равномерно скрученных по всей длине с шагом 5 скруток на 1 см. Общее число витков делительной обмотки 300. Индуктивность рассеяния секции $L_s=1,2 \text{ мкГн}$, а межпроводная емкость $C_0=420 \text{ пФ}$. Эти параметры обмотки определялись на автоматизированной установке [10]. При проведении экспериментов на вход делителя от генератора ГЗ-112 подавалось периодическое двухполярное прямоугольное напряжение с нулевой постоянной составляющей (меандр) амплитудой 0,5 В и частотой 2 кГц.

Визуализация входного и выходных напряжений ИДН осуществлялась по цифровому осциллографу Tektronix TDS2012 с полосой пропускания 100 МГц (рис. 3). При приемлемой форме переднего фронта входного импульса (рис. 3, а) наибольшие искажения наблюдаются у сигналов нижних отводов (рис. 3, б, в). В то же время отличия сигналов на верхних отводах (рис. 3, д, е) от входного незначительны.

Заметим, что выходное напряжение на среднем отводе (рис. 3, з) в два раза меньше входного, а по форме они идентичны. Полагаем, что это является подтверждением правильности разработанного подхода оценки переходного процесса в ИДНСО. Действительно, как видно из (5) для среднего отвода динамическая погрешность равна нулю.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов перенапряжений, рассчитанные по формуле [11],

$$\varepsilon_n = \frac{h_{\text{nm}} - h_{\text{ном}}}{h_{\text{ном}}} \cdot 100 \%,$$

где h_{nm} — максимальное, а $h_{\text{ном}}$ — установившееся значения переходной характеристики.

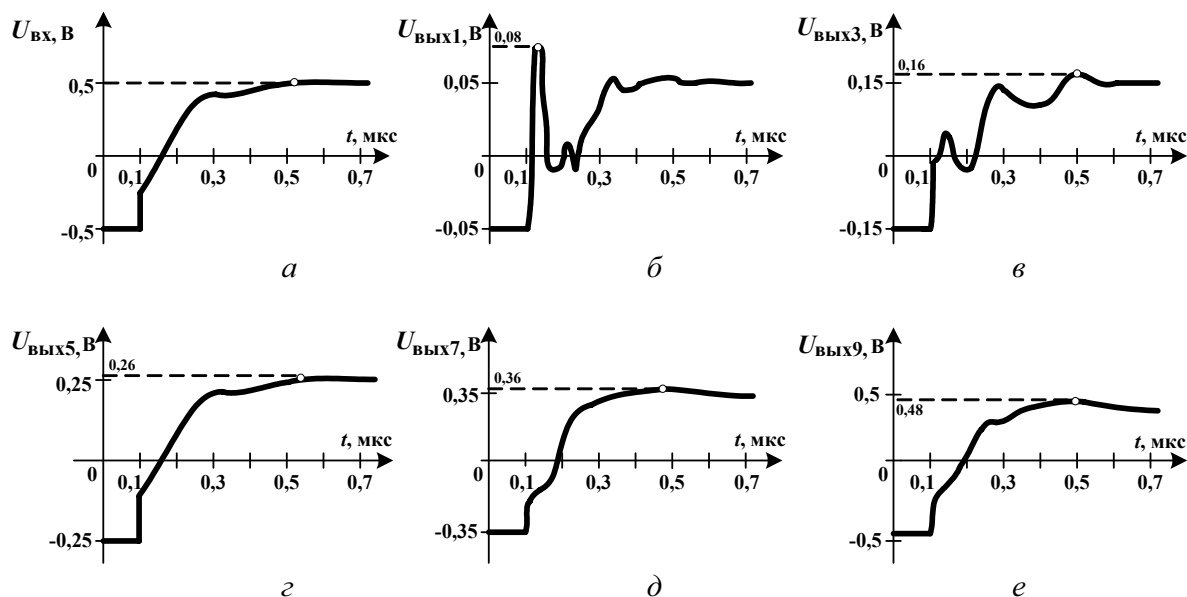


Рис. 3. Реакция ИДНСО на характеристический испытательный сигнал

Таблица 2. Коэффициенты перенапряжений переходных характеристик декадного ИДНСО

Переходная функция $h_n(t)$	ε_n , %
$h_1(t)$	30
$h_2(t)$	9
$h_3(t)$	4
$h_4(t)$	5
$h_5(t)$	2
$h_6(t)$	3
$h_7(t)$	2
$h_8(t)$	5
$h_9(t)$	3

Из табл. 2 видно, что на первом отводе делительной обмотки ИДНСО коэффициент перенапряжения достигает по сравнению с другими отводами максимального значения $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1 = 30\%$. Заметим, что и в классическом одножгутовом ИДН [1], отличающимся большими частотными погрешно-

стями, максимальный коэффициент перенапряжения, равный 170 %, также наблюдался на первом отводе [1].

Выводы

1. Разработан метод оценки перенапряжений при ступенчатом воздействии в декадном индуктивном делителе напряжения с симметрирующей обмоткой, основанный на полиномиальном представлении приведенного коэффициента передачи делителя.
2. Показано, что коэффициент перенапряжения имеет максимальное значение на первом отводе делителя. Это обстоятельство необходимо учитывать при поверке и калибровке средств измерений с применением индуктивных делителей напряжения для защиты входных цепей нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ким В.Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения. — Томск: Изд-во ТПУ, 2009. — 214 с.
2. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 42 с.
3. Ким В.Л. Широкополосный индуктивный делитель напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2003. — № 9. — С. 22–24.
4. Ким В.Л. Математическое моделирование индуктивного делителя напряжения в системе MATLAB // Электричество. — 2006. — № 8. — С. 23–29.
5. Иьерс Р.Р., Силламаа Х.В., Эйскоп И.Ю. Переходная характеристика индуктивных делителей напряжения // Известия вузов. Приборостроение. — 1970. — № 7. — С. 26–30.
6. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. — Л.: Энергия, 1971. — 148 с.
7. Ушаков Е.И. Об упрощенных моделях переходных процессов электроэнергетических систем // Электричество. — 2005. — № 10. — С. 38–44.
8. Hoer C.A., Smith W.L. A 2:1 Ratio Inductive Voltage Divider with Less than 0.1 PPM Error to 1 MHz // Journal of Research of NBS. Scien. Eng. and Instrum. — 1967. — V. 71C. — № 2. — P. 101–109.
9. Грановский В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 224 с.
10. Ким В.Л., Меркулов С.В. Компьютерная система измерения характеристик индуктивных делителей напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2006. — № 3. — С. 42–45.
11. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Копылова. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. — 832 с.

Поступила 21.01.2011 г.